



Poznań, 7.02.2025

dr hab. inż. Michał Rychlik, prof. uczelni
Politechnika Poznańska
Wydział Inżynierii Mechanicznej
Instytut Mechaniki Stosowanej

Recenzja rozprawy doktorskiej

Pana mgr inż. Mateusza Meseka

pt. „The noninvasive technique of determining local stiffness of human arteries”

przygotowana pod kierunkiem naukowym Promotorów

dr hab. inż. Ziemowita Ostrowskiego oraz prof. Leifa Rune Hellevika

w dyscyplinie Inżynieria Biomedyczna

1. Podstawa formalna sporządzenia recenzji

Podstawą formalną przygotowania niniejszej recenzji jest uchwała nr 104/2024 Rady Dyscypliny Inżynieria Biomedyczna Politechniki Śląskiej z dnia 21 listopada 2024 r. (pismo: RDIB.0211.104.2024).w sprawie powołania na recenzenta rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Mateusza Meseka. Podstawą sporządzenia recenzji była dostarczona rozprawa doktorska.

2. Aktualność wyboru tematu i umiejscowienie tematyki badawczej

Na świecie prowadzonych jest wiele badań przez naukowców z różnych ośrodków badawczych, dotyczących aspektów związanych z układem krwionośnym, a w szczególności tętnicami. Badania obejmują zarówno poszukiwanie nowych technik i metod wspomagających diagnostykę, opracowywania precyzyjniejszych modeli opisujących zjawiska fizyczne zachodzące w tętnicach, badania właściwości materiałowych, jak również budowy modeli numerycznych i analiz z ich wykorzystaniem.

Szczególnie obiecujące są badania związane z wykorzystaniem modeli numerycznych (np. wykorzystujących metodę elementów skończonych), w których wykorzystywany jest odpowiednio zaawansowany opis właściwości mechanicznych materiałów i zachodzących między nimi interakcji.



Dlatego też nadal powstają prace przedstawiające nowe, rozszerzone modele umożliwiające, dokładniejsze opisanie i analizowanie zjawisk zachodzących w tętnicach i ich wpływu na parametry przepływu krwi, jak również organy (np. serce). Ma to szczególne znaczenie w kontekście wspomaganego diagnozowania chorób układu krwionośnego, oceny stopnia rozwoju danego schorzenia oraz planowania przebiegu leczenia.

Z uwagi na środowisko, w którym znajdują się tętnice (tkanki miękkie), bardzo specyficzne warunki pracy związane z przepływem krwi, jak również faktu, iż w świetle najnowszych badań krew wykazuje cechy cieczy nienewtonowskiej, a elastyczna budowa ścian tętnic wymaga zastosowania nieliniowych opisów materiałowych, przez co uzyskiwane modele nadal nie w pełni oddają złożoność zachodzących zjawisk, w związku z czym poszukiwane są nowe rozwiązania.

Zatem podjęta w recenzowanej rozprawie problematyka opracowania metodyki bezinwazyjnego wyznaczenia sztywności tętnic jest tematem bardzo złożonym i odpowiednio wpisuje się w aktualne trendy badawcze w obszarze dyscypliny inżyniera biomedyczna, w szczególności związane z badaniami z zakresu modelowania elementów układu krwionośnego.

3. Formalna charakterystyka rozprawy doktorskiej

Przedstawiona do recenzji rozprawa stanowi opracowanie naukowe o charakterze metodyczno-eksperymentalnym, w którym zaproponowano i przedstawiono metodykę pomiaru sztywności tętnic z wykorzystaniem pomiaru USG przemieszczenia ściany tętnicy, pomiaru przebiegu ciśnienia w tętnicy tonometrem aplanacyjnym wraz z rozwiązaniem problemu odwrotnego do wyznaczenia modułu Younga. W zakresie eksperymentalnym przeprowadzono walidację zaproponowanej w rozprawie metodologii z wykorzystaniem sztucznej tętnicy o znanych właściwościach mechanicznych oraz wykorzystanie opracowanego narzędzia na danych medycznych (pomiaru parametrów tętnic szyjnych pacjentów).

Rozprawa doktorska poddana ocenie napisana jest w języku angielskim, liczy 114 stron i zawiera 97 pozycji cytowanego piśmiennictwa, 32 rysunki (Figure) i 22 tabele (Table) znajdujące się w tekście pracy oraz 4 rysunki (Figure) zamieszczone w załączniku. Praca składa się z 8 numerowanych rozdziałów (Chapter) oraz nienumerowanych bibliografii (Bibliography), streszczenia w języku angielskim (Summary) oraz streszczenia w języku polskim (Summary in Polish).

4. Ocena merytoryczna pracy

W rozdziale 1 (Chapter 1) nazwanym „Introduction” (liczącym 12 stron i podzielonym na kilka podpunktów), Doktorant przedstawił wstęp do poruszanej tematyki w aspekcie



elastyczności tętnic i jej wpływu na występowanie schorzeń układu krążenia. Autor sformułował również cel rozprawy, którym jest opracowanie nieinwazyjnej procedury szacowania modułu Younga lewej tętnicy szyjnej wspólnej (LCCA) na podstawie pomiaru ultrasonograficznego przemieszczenia ściany tętnicy i pomiaru ciśnienia wewnątrz tętnicy za pomocą tonometrii aplanacyjnej. Przedstawiony cel pracy jest ambitny i posiada cechy aplikacyjne, szczególnie w przypadku opracowania docelowego oprogramowania, który następnie byłby poddany walidacji na pełnej grupie badawczej pacjentów. Według recenzenta pewnym mankamentem w rozprawie wydaje się brak postawionych też badawczych, które Doktorant by potwierdził lub obalił podczas realizacji badań, a na zakończenie rozprawy poddał pod dyskusję.

W kolejnych podpunktach rozdziału 1 Doktorant przedstawił przegląd literatury na temat istniejących technik nieinwazyjnych metod estymacji oraz na temat proponowanej metody rozwiązania problemu odwrotnego. Szczegółowo przedstawił sposób poszukiwania i wyboru konkretnych pozycji literaturowych – co należy ocenić bardzo pozytywnie. Przedstawiony opis literatury pozwala w sposób bardzo przejrzysty i łatwy odszukać właściwe publikacje. Następnie przedstawił w sposób syntetyczny najważniejsze informacje zawarte w artykułach mające istotne znaczenie w kontekście poruszanej tematyki rozprawy doktorskiej. Niezrozumiałym w oczach recenzenta jest przedstawienie podpisów tabel umieszczone pod tabelami, które to miejsce najczęściej zarezerwowane jest dla podpisów pod rysunkami. W przypadku tabel przyjmuje się, że odpowiedni opis umieszczony jest przed (nad) tabelą, której on dotyczy. Obecna formuła opisów tabel, przyjęta przez Doktoranta, wprowadza pewne utrudnienie w poszukiwaniu odpowiedniej tabeli podczas analizy tekstu. Dodatkową słabą stroną tego rozdziału jest zamieszczenie w skróconym opisie poszczególnych rozdziałów rozprawy, podpunkt 1.2. „Outline”, znajdujący się na stronie 9. Zamianie miejscami uległy opisy rozdziału 3 (Chapter 3) i rozdziału 4 (Chapter 4), który wymieniony jest przed rozdziałem 3. Co więcej, opis rozdziału 5 (Chapter 5) znalazł się na końcu wcześniejszego podpunktu tj. podpunkt 1.1. Taki stan rzeczy na początku pracy powoduje u czytelnika poczucie braku panowania autora nad edytorską stroną pracy.

W rozdziale 2 (Chapter 2) nazwanym „Theory” (liczącym 18 stron), Doktorant przedstawił podstawowe elementy i równania mechaniki kontinuum niezbędne do zrozumienia sformułowania modeli konstytutywnych liniowych materiałów sprężystych, jak również hiperelastycznych. Ponadto omówiono w nim problemy odwrotne i najczęściej stosowane techniki rozwiązywania tych problemów, regularyzację oraz algorytmy filtrowania Kalmana wraz z opisującymi je równaniami. Wszystkie równania posiadają stosowną numerację za wyjątkiem równania znajdującego się na stronie 30 – pomiędzy równaniami oznaczonymi jako (2.53) oraz (2.54). W wymienionym przypadku równanie to nie posiada swojego identyfikatora.



W rozdziale 3 (Chapter 3) nazwanym „Experiments” (liczącym 8 stron), Doktorant przedstawił opis stanowiska badawczego oraz parametrów poszczególnych elementów aparatury, niezbędnych dla przeprowadzenia eksperymentu w celu zebrania odpowiednich danych do przetestowania zaproponowanej metod nieinwazyjnej oceny sztywności tętnicy szyjnej wspólnej (LCCA). Stanowisko badawcze powstało jako rezultat realizacji projektu ENTHRAL (finansowanego ze źródeł Norweskich - Norwegian Financial Mechanism 2014-2021). Zasadniczo rozdział ten stanowi wersję skróconą artykułu pt. „Evaluating the precision and reproducibility of non-invasive deformation measurements in an arterial phantom” opublikowanego w Measurement w 2023 r., którego Doktorant jest współautorem, a oznaczonego w literaturze rozprawy jako pozycja [77]. Większość rysunków (Figure) znajdujących się w tym rozdziale (poza rysunkami 3.5, 3.6 i 3.7) również pochodzi z artykułu [77]. Ponadto wskazał, iż pomiary ultrasonograficzne wraz z przetwarzaniem danych ultrasonograficznych zostały przeprowadzone przez dr inż. Jana Juszcyka (Katedra Informatyki Medycznej i Sztucznej Inteligencji, Wydział Inżynierii Biomedycznej, Politechnika Śląska).

W ocenie recenzenta wydaje się, że nazwa tego rozdziału nie do końca jest trafna i winna być raczej zbliżona do „Materials and methods”, aniżeli „Experiments” tak jak jest zapisane obecnie. Jako uzupełnienie tego rozdziału, mógłby się pojawić opis zadań i ich zakresu, w których doktorant brał bezpośredni udział w odniesieniu do opisanego artykułu [77]. W artykule jest część „CRediT authorship contribution statement” zawierająca oświadczenia o wkładzie autorskim w powstanie artykułu. Jednak w przypadku opisu wkładu autorskiego Doktoranta, jest on dość ograniczony, przez co nie daje pełnego wglądu w zakres prac przy tworzeniu artykułu. Brakującą informacją w podrozdziale 3.3. Medical data, jest liczba pacjentów, tym bardziej że na stronie 44 pojawia się opis pod rysunkami, w których widnieje określenie „Patient3”. Nie jest wyjaśnione również, dlaczego dokonano wyboru akurat danych „Patient3” do przedstawienia porównawczego przebiegu ciśnienia (Figure 3.6 oraz Figure 3.7). Zachodzi zatem pytanie, czy w przypadku innych pacjentów wykresy miały inny charakter? Czy pokazane na rysunkach 3.6, 3.7 wykresy są przypadkiem reprezentatywnym, czy może mają one charakter jedynie przykładowy?

Na rysunku 3.6 nieczytelne są wartości przedstawione na poszczególnych osiach – wskazane by było powiększenie rozmiaru wykresu lub poprawa jakości (rozdzielczości) opisów poszczególnych osi.

W rozdziale 4 (Chapter 4) nazwanym „Proposed approach” (liczącym 12 stron), w poszczególnych podpunktach Doktorant omówił zagadnienia związane z badaniem wrażliwości siatki elementów skończonych dla dwóch typów siatek (zgrubnej i dokładnej), porównaniu statycznej i dynamicznej analizy metodą elementów skończonych. Autor przedstawił również szczegóły geometrii, właściwości mechanicznych zastosowanego materiału i opisał algorytm używany do przetwarzania danych pozyskanych z układu kamer



oraz czujników zabudowanych na stanowisku eksperymentalnym. Opisano także testy z wykorzystaniem oprogramowania FEBio przeznaczonego do analiz MES oraz przeprowadzenia filtrowania Kalmana. W części końcowej rozdziału Doktorant przedstawił dane eksperymentalne pozyskane na podstawie fantomu sztucznej tętnicy i opisuje algorytm używany do przetwarzania tych danych. Do uwag krytycznych w tym rozdziale należy zaliczyć „wadliwe” umiejscowienie rysunku 4.1. (obecnie u góry strony 46), podczas gdy opis odnoszący się do niego znajduje się dopiero na samym dole strony. Podobna sytuacja dotyczy rysunku 4.2. ze strony 47, który nie dość, że poprzedza odnoszący się do niego przypis i tekst, to znajduje się w niewłaściwym podrozdziale tj.. 4.1.1 geometry, Bondary conditions, material constants and mesh sensitivity, zamiast w podrozdziale 4.1.2 Mesh sensitivity, w którego akapicie znajduje się stosowny odnośnik Figure 4.2.

Ponadto zdaniem recenzenta rysunki 4.4, 4.5 oraz 4.6 zawierające wykresy mogłyby być powiększone, tak aby wykorzystywały całą dostępną szerokość strony. Dzięki temu zaprezentowane na nich wykresy byłyby bardziej czytelne, a przez to można by na nich lepiej ocenić dokładność nakładania się danych pomiarowych. Ponadto w podrozdziale 4.2.1 Patients data, również nie podano liczby przebadanych pacjentów. Dopiero z tabel 4.7 oraz 4.8 można się domyślać, że liczba pacjentów wynosi 3 (jedna kobieta i dwóch mężczyzn). Co więcej, w obu tych tabelach zastosowano opisy numeracji pacjentów, pisanych raz małą, a raz wielką literą. W podpunkcie 4.2 Experimental data – phantom, Doktorant wskazał, iż pomiary właściwości mechanicznych próbek przeprowadził dr hab. inż. Grzegorz Kokot, Katedra Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, w ramach projektu ENTHRAL. Natomiast pomiary średniej grubości materiału zostały określone za pomocą promieniowania rentgenowskiego w ramach projektu ENTHRAL, wykonane przez dr inż. Łukasza Krzemińskiego (Laboratorium Naukowo-Dydaktyczne Nanotechnologii i Technologii Materiałowych, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska).

Rozdział 5 (Chapter 5) nazwany „Model validation” (liczący 14 stron), przedstawiono zagadnienia związane z walidacją modelu, wynikami symulacji z wykorzystaniem opisu materiału liniowo-sprężystego i opisu materiału Neo-Hookean, które następnie porównywano z danymi eksperymentalnymi pozyskanymi dla czterech wariantów fantomów tętnic: b2, b3, b4, b5. Parametry obciążenia fantomów tętnic odpowiadały czterem stanom fizjologicznym skategoryzowanym jako parametry pracy: A - optymalne, B - normalne, C - wysokie normalne i D - nadciśnienie stopnia 1. Jako wynik prowadzonych rozważań wybrano najbardziej odpowiedni model do dalszej analizy w kolejnych rozdziałach rozprawy. W przypadku zapisów opisujących poszczególne próbki (b3, b4, b5, b6) nasuwa się pytanie dlaczego nie przedstawiono wyników dla próbek b1 i b2, lub przynajmniej wyjaśnienia dlaczego przyjęto taką numerację próbek z pominięciem oznaczeń b1, b2?



Ponadto pewne zastrzeżenia edytorskie można wysunąć w odniesieniu do prezentacji rysunków i tabel zawartych w podrozdziałach 5.1 Sample b3 (str. 58), 5.2 Sample b4 (str. 62), 5.3 Sample b5 (str. 65), 5.4 Sample b6 (str. 68) opisujących wyniki uzyskane dla poszczególnych próbek sztucznej tętnicy. W przedstawionych podrozdziałach brak jest jakichkolwiek opisów, komentarzy tekstowych przedstawionych na rysunkach i w tabelach danych. Co więcej nie ma też z tego powodu żadnych odnośników w tekście do ww. pozycji.

Rozdział 6 (Chapter 6) nazwany „Numerical examples and results” (liczący 10 stron), przedstawiono w nim zagadnienia związane z przykładami numerycznych analiz opartych na danych półempirycznych, umożliwiającymi zweryfikowanie zaproponowanej metody z wykorzystaniem rozszerzonego filtru Kalmana i podwójnie rozszerzonego filtru Kalmana w oparciu o fantomy tętnic o znanych parametrach fizycznych. Ponadto Autor rozprawy przedstawił testy filtrowania Kalmana przeznaczonych do szacowania przemieszczenia ścianek tętnicy i określenia modułu Younga. Przedstawiono i opisano wyniki uzyskane na podstawie eksperymentu oraz grupie trzech pacjentów. Pytanie jakie się nasuwa, to z czego wynika tak mocno ograniczona grupa pacjentów? Jakie uwarunkowania do tego doprowadziły.

W rozdziale 7 (Chapter 7) nazwanym „Discussion and Conclusions” (liczącym 4 strony), Doktorant przeprowadził dyskusję wyników i przedstawił wnioski końcowe, wykazując, że cel pracy został osiągnięty – co zostało poparte wynikami przeprowadzonych badań opisanych we wcześniejszych rozdziałach. Uzupełnieniem tej części pracy są uwagi Doktoranta dotyczące możliwości ulepszenia zaproponowanego w rozprawie podejścia, w celu wdrożenia go w praktyce klinicznej, jako narzędzia z potencjałem pracy w tzw. czasie rzeczywistym, co należy uznać za zdecydowanie na plus. Pewien niedosyt w dyskusji pozostawia fakt praktycznie braku odwołania się do prac innych autorów i porównania uzyskanych przez siebie wyników z wynikami uzyskiwanymi przez innych badaczy. Daje to czytelnikowi wrażenie, że tej części rozprawy poświęcono mniej uwagi.

W rozdziale 8 (Chapter 8) nazwanym „Appendix” (liczącym 26 stron), Doktorant przedstawił materiały dodatkowe, w postaci szczegółowej zasady działania zastosowanego w zaproponowanym podejściu filtru Kalmana oraz kod napisany w języku Python, służący do przetwarzania danych pomiarowych (wejściowych) i implementacji filtru Kalmana.

Poza wymienionymi wcześniej 8 rozdziałami w rozprawie znajdują się nienumerowane rozdziały takie jak: Bibliografia („Bibliography”) licząca 10 stron oraz dwa odpowiadające sobie streszczenia, z czego jedno w języku angielskim „Summary” (1 strona), a drugie w języku polskim „Summary in Polish” (2 strony). Do uwag należy wskazać, że wykaz



Bibliography nie został ujęty w spisie treści umieszczonym na początku rozprawy – str. 5 i str. 6. Ponadto na stronach 112 i 114, na których znajdują się streszczenia (Summary), w górnej części stron umieszczono znaczki rozdziału zatytułowane „Bibliography”, zamiast „Summary”.

Pod względem techniczno-redakcyjnym struktura pracy jest kompletna, posiada wszystkie typowe dla rozpraw doktorskich elementy, podział na poszczególne rozdziały jest logiczny i czytelny. Tekst pracy został zredagowany poprawnie i starannie, poza opisanymi powyżej błędami. Rysunki oraz tabele zostały wykonane estetycznie i przejrzyste, a cała praca sprawia pozytywne wrażenie spójnej całości. Jednocześnie słownictwo jakim operuje Doktorant pozwala na zrozumienie przedstawianych treści.

5. Uwagi krytyczne do rozprawy

Pomimo podjęcia tematyki o charakterze użytkowym i aplikacyjnym, w zaprezentowanej rozprawie w ramach analizy danych medycznych przedstawiono wyniki oparte na bardzo ograniczonej liczbie pacjentów (3 osoby), co zdaniem recenzenta mocno ogranicza możliwości definiowania wniosków w zakresie jakości i powtarzalności uzyskiwanych zaproponowaną metodyką wyników opartych na rzeczywistych danych medycznych, a także w zidentyfikowaniu problemów, które mogą się pojawić podczas analizy danych uzyskanych od pacjentów, u których występują znaczne zmiany chorobowe.

W rozprawie Autor wykorzystał do swoich analiz MES oprogramowanie open-source FEBio, które jest oprogramowaniem wyspecjalizowanym w zakresie wykonywania analiz z obszaru inżynierii biomedycznej. Jednak pomimo tego uzyskane wyniki nie zostały zweryfikowane z wynikami z innego uznanego oprogramowania MES (np. ANSYS, ABAQUS, COMSOL itp.), co w przypadkach medycznych jest często praktykowane. Szczególnie jest to widoczne dla analiz opartych na niewielkiej liczbie próbek eksperymentalnych (rzeczywistych materiałów badanych pacjentów) lub chęcią weryfikacji wpływu danego solvera na uzyskiwane rezultaty.

6. Wnioski końcowe

Pan mgr inż. Mateusz Mesek przedstawił do oceny ciekawą rozprawę doktorską, której tematyka została właściwie wybrana i która wpisuje się we współczesne trendy badań prowadzonych w obszarze dyscypliny inżynieria biomedyczna.

Za istotny i oryginalny element naukowy recenzowanej rozprawy doktorskiej należy uznać zaproponowaną przez Doktoranta nieinwazyjną procedurę szacowania modułu Younga lewej tętnicy szyjnej wspólnej (LCCA) na podstawie pomiaru ultrasonograficznego przemieszczenia ściany tętnicy i pomiaru ciśnienia wewnątrz tętnicy za pomocą tonometrii



aplanacyjnej, a w szczególności zastosowania metody rozwiązania problemu odwrotnego opartej na podwójnym rozszerzonym filtrze Kalmana, wraz z opisem poszczególnych elementów opracowanej metody oraz weryfikacją wyników w oparciu o eksperyment.

Dlatego też podjęty temat rozprawy ma znaczenie nie tylko poznawcze, ale również użyteczne, ponieważ może w przyszłości zostać wykorzystany do opracowania metody diagnostycznej stosowanej w placówkach medycznych, umożliwiając ocenę sztywności ścian tętnic konkretnych pacjentów, co przekłada się na ocenę zaawansowania choroby układu naczyniowego (np. takich jak zawał, niewydolność serca, udar, migotanie komór sercowych itp.) i pomoc w wyborze skuteczniejszego personalizowanego procesu leczenia.

Pan mgr inż. Mateusz Mesek wykazał się bardzo dobrą znajomością wiedzy teoretycznej i umiejętnościami w zakresie realizacji prowadzonych badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych. Zawartość merytoryczna pracy jest odpowiednia i przemyślna, a przedstawione uwagi i sugestie, w ramach rozdziału 3 oraz rozdziału 4 niniejszej recenzji, nie wpływają na wartość merytoryczną rozprawy oraz na jej całościowy pozytywny odbiór.

Podsumowując moją recenzję stwierdzam, że oceniana rozprawa doktorska mgr inż. Mateusza Meseka p.t. „The noninvasive technique of determining local stiffness of human arteries” spełnia wymagania określone przez Ustawę (Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz. U. z 2014, poz. 1571) stawiane rozprawom doktorskim. Tym samym wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynierii Biomedycznej Politechniki Śląskiej o dopuszczenie Pana mgr inż. Mateusza Meseka do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia naukowego doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria biomedyczna.

dr. hab. inż. Michał Rychlik, prof. PP